

Polytronik

Kowalsky, Wolfgang

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 54, 2004,
S.115-130



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Polytronik

WOLFGANG KOWALSKY

Labor für Elektrooptik, Institut für Hochfrequenztechnik,
Technische Universität Braunschweig
Dorothea-Erxleben-Straße 41 B, D-38116 Braunschweig

„Am Anfang war’s Käse!“ In der Geschichte des Kunststoffs wird ein neues Kapitel aufgeschlagen – vom Käsekonzentrat zum Mikrochip [1].

Mit diesem Rückblick auf das Jahr 1530, in dem B. Schobinger eine Rezeptur zur Gewinnung einer Ersatzsubstanz für Rinderhorn als Einstieg in die Chemie der Kunststoffe vorstellte, lud der Projektträger Informationstechnik des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im August 2002 zu einer Presseveranstaltung unter dem Motto „Polytronik: Intelligenz in Plastik – Polymer-elektronik für das 21. Jahrhundert“ ein.

Während Kunststoffe aus kaum einem Bereich unseres Alltags mehr wegzudenken sind, spielten sie in der Elektronik und Photonik bisher nur eine begleitende Rolle. Abgesehen von sehr wenigen Ausnahmen (z. B. Flüssigkristall) wurde von diesem Allroundwerkstoff kaum mehr als die Eigenschaft der elektrischen Isolation genutzt. Aus diesem Schattendasein treten derzeit organische Materialien nach beachtlichen Erfolgen in langjähriger Grundlagenforschung als neuartige elektronische und photonische Funktionswerkstoffe heraus: Komplexe, maßschneiderbare organische Verbindungen erobern Anwendungsfelder als elektrische Leiter, Halbleiter und Lichtemitter, die bisher ausschließlich anorganischen Materialien vorbehalten waren. Vorrangiges Ziel dieser sogenannten Polytronik (*Polymerelektronik*) ist es nicht, mit der klassischen Silizium- und III-V-Halbleitertechnologie in Konkurrenz zu treten, sondern neue Anwendungsfelder zu erschließen, die diesen prinzipiell nicht zugänglich sind.

Die **organische Elektrolumineszenz** wird seit mehr als 15 Jahren intensiv erforscht. Sie ermöglicht flache selbstleuchtende Displays, deren hohe Effizienz insbesondere für mobile Anwendungen sehr vorteilhaft ist. Während diese OLED-Displays die Schwelle zur Markteinführung bereits überschritten haben, ist die

* (Eingegangen 26.01.2004)

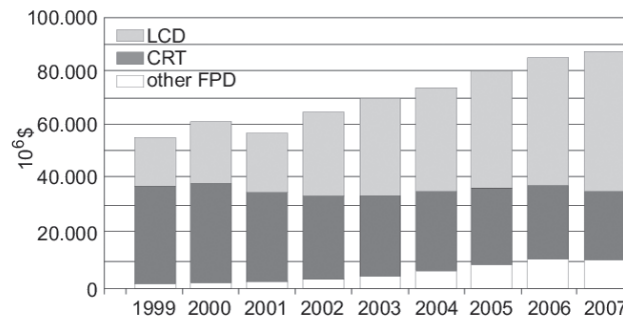


Bild 1: Weltweiter Displaymarkt [1]

organische Elektronik noch eher im Bereich der Grundlagenforschung anzusiedeln. Diese Technologie tritt nicht in Konkurrenz zu anorganischen Halbleitern, sondern erschließt durch die angestrebte kostengünstige Rolle-zu-Rolle Fertigung neue Produktfelder. **Organische Laser**, deren Erforschung sich ebenfalls noch in einer frühen Phase befindet, belegen die außerordentliche Stabilität organischer Materialien. Sie ermöglichen Laser im gesamten sichtbaren Spektralbereich.

Organische Elektrolumineszenz

In der heutigen Zeit gewinnen Anzeigeelemente als Bindeglied zwischen Maschine und Mensch einen immer größeren Stellenwert. Die Anforderungen an derartige Displays sind vielseitig und die Anwendungsgebiete für den Einsatz von einfachen Anzeigeelementen bis hin zu großflächigen Vollfarbdisplays nehmen in unserer multimedialen Gesellschaft stetig zu [2]. Folglich zeigt auch der Displaymarkt, wie Bild 1 belegt, ein bemerkenswertes Wachstum von jährlich etwa 15% bei einem weltweiten Gesamtvolumen von über 40 Milliarden €.

In diesem hart umkämpften Markt hat kaum eine neue Technologie eine stürmischere Entwicklung erfahren wie die organische Elektrolumineszenz und ihre Anwendung in flachen selbstleuchtenden Displays. OLEDs (organic light emitting diodes) werden in zwei zunächst konkurrierenden, inzwischen aber häufig kombinierten Technologien hergestellt: Die „Small Molecule-OLEDs“ (SM-OLED), also OLEDs aus kleinen Molekülen, werden vorrangig durch Vakuumsublimation dieser niedermolekularen Verbindungen hergestellt, während „Polymer-OLEDs“ (P-OLED) auf nasschemischen Beschichtungen (Aufschleudern, Drucken, Tauchen oder Sprühen) basieren.

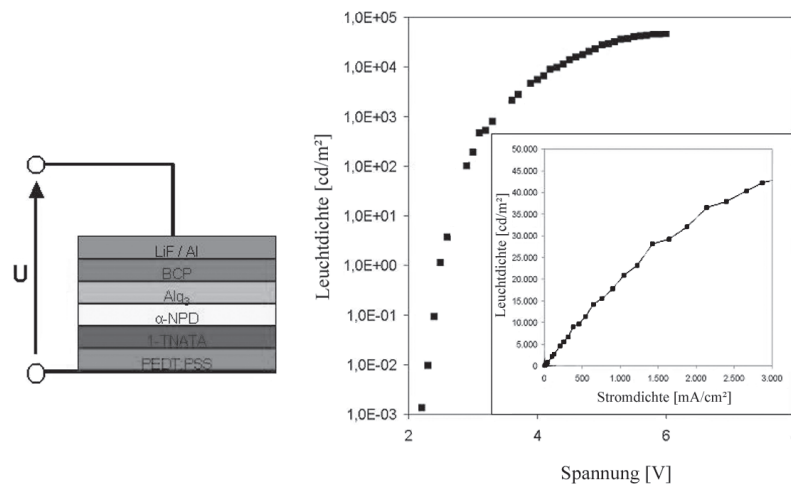


Bild 2: Aufbau und Leistungskennlinie einer grün emittierenden OLED

In ihrer Funktion unterscheiden sich die Polymer- und SM-Dioden nicht. Beide beruhen auf der Elektrolumineszenz organischer Materialien. Über eine Anode und eine Kathode werden Löcher bzw. Elektronen in die organischen Schichten injiziert. Diese bilden in der Emissionszone angeregte Zustände aus, so genannte Exzitonen, die teilweise ihre Energie in Form von Licht „strahlend“ abgeben [3]. Um das Licht abstrahlen zu können, wird bei konventionellen OLEDs die Anode auf dem Glassubstrat aus leitfähigem transparentem Indium-Zinn-Oxid (ITO) abgeschieden, das auch bei LC-Displays als Kontaktmaterial eingesetzt wird.

Effiziente Bauelemente können allerdings nur mit Mehrschichtsystemen aufgebaut werden, da die organischen Materialien unterschiedliche Eigenschaften für den Elektronen- und Löchertransport aufweisen. So ist es möglich, den Ort der Rekombination der Elektronen mit den Löchern im Bauelement durch eine geeignete Schichtenfolge festzulegen. Für den in Bild 2 dargestellten Standardaufbau einer im grünen Emissionsbereich emittierenden OLED kamen die organischen Halbleiter CuPc, das Starburst-Derivat 1-TNATA sowie das aromatische Amin α-NPD für den Löchertransport zum Einsatz. Als Emissionsmaterial dient der Metall-Chelat-Komplex Alq₃ dotiert mit etwa 1% Chinacridon. Die Einsatzspannung liegt bei der Photonenenergie von 2,2 V, die für ein Mobiltelefon erforderlichen 100 cd/m² erreicht sie bereits bei 3V und bei 4,7 V beträgt die Helligkeit sogar 10.000 cd/m². Dieses Beispiel belegt die Leistungsfähigkeit von OLEDs, so dass sie eine interessante Basis für eine emissive Displaytechnologie bilden.

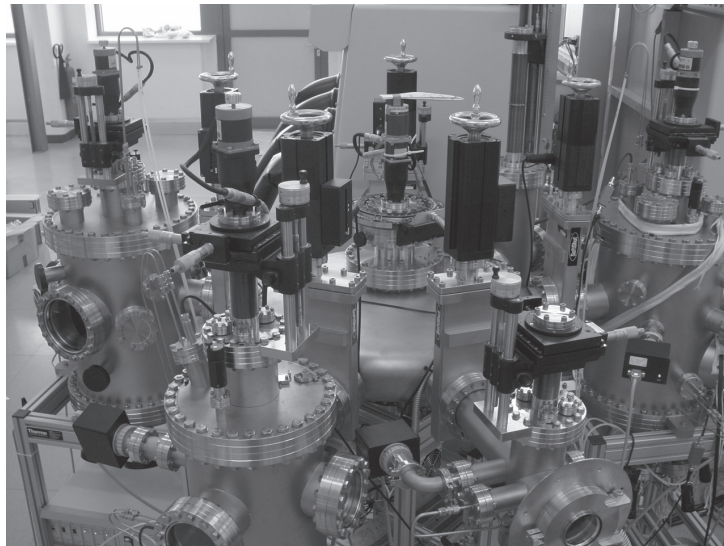


Bild 3: Cluster-OMBD für die OLED-Forschung

Die großflächige, defektfreie und in der Schichtdicke präzise kontrollierte Abscheidung der organischen Schichten ist die größte Herausforderung für die OLED-Displayfertigung. In der Grundlagenforschung werden bevorzugt Cluster-Vakuumanlagen (OMBD, organic molecular beam deposition), wie die in Bild 3 dargestellte Laboranlage des Instituts, eingesetzt. Um einen zentralen Substratmanipulator herum sind die einzelnen Prozesskammern für das Aufdampfen der organischen Schichtenfolge und der Deckmetallisierung angeordnet. Ein derartiges System bietet zwar eine hohe Flexibilität für die Forschung, limitiert aber aufgrund des seriellen individuellen Substrathandlings den Probendurchsatz derart, dass hiermit keine kostengünstige Produktion realisiert werden kann.

In Zusammenarbeit mit der Firma Applied Films wurde daher ein in-line-OMBD-Prozess entwickelt: Die in Bild 4 dargestellte weltweit erste in-line-Anlage erlaubt die Beschichtung von Substraten bis $180 \times 240 \text{ mm}^2$ während des kontinuierlichen Transports durch das langgestreckte Vakuumsystem: Orthogonal zur Transportrichtung sind lineare Verdampferquellen in geringem Abstand unter dem Substrat angeordnet, die eine homogene Schichtabscheidung bei hoher Materialausbeute ermöglichen. Zur Steigerung der OLED-Lichteffizienz und zur Erzeugung unterschiedlicher Farben werden die Emissionsschichten dotiert. Über die Dotierung kann die Emission der OLEDs von der in Bild 1 gezeigten grünen Emissionswellenlänge in den blauen oder roten Bereich ver-



Bild 4: Produktionsnahe in-line-Depositionsanlage

schoben werden, so dass auch die Herstellung eines mehrfarbigen oder vollfarbigen RGB-Displays möglich ist [4].

In Kooperation mit der Firma Aixtron wird am Institut derzeit ein neuartiges Abscheidungsverfahren, die OVPD-Technik (engl. **o**rganic **v**apour **p**hase **d**eposition, Bild 5), erprobt. Im Gegensatz zur OMBD-Anlage, bei der das organische Material im Hochvakuum sublimiert wird und sich dann auf dem Glassubstrat abscheidet, wird bei der OVPD das organische Quellenmaterial in einen Gasstrom sublimiert. Dieser Gasstrom wird durch einen sogenannten Showerhead geleitet, der ihn gleichmäßig in einer Reaktorkammer über dem gekühlten Glassubstrat verteilt. Präzise Schichtdicken- und Dotierungskontrolle bei hoher Materialausbeute zeichnen dieses Verfahren aus.

Die Herstellung eines Passiv-Matrix-Displays mit Lichtemission durch das Glassubstrat stellt auch spezifische Anforderungen an die Substratstrukturierung, da bei organischen Halbleitern keine gängigen Strukturierungsverfahren der Mikroelektronik eingesetzt werden können. So ist z.B. eine photolithographische Strukturierung der organischen Dünnschichten selbst nicht möglich, da Feuchte und die verwendeten Lösungsmittel die Schichten angreifen oder sogar völlig zerstören würden. Ein etabliertes Verfahren für monochrome oder mehrfarbige Displays, das durch Bild 6 verdeutlicht wird, ist die Verwendung von Kathodenseparatoren. Nach der nasschemischen Strukturierung der ITO-Zeilen werden für die Definition der Spalten orthogonal zu den Zeilen pilzförmige Polymer-



Bild 5: OVPD-Anlage der Firma Aixtron

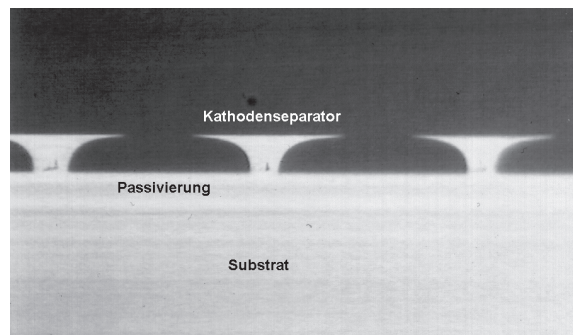


Bild 6: Display-Strukturierung durch Kathodenseparatoren

rippen lithographisch präpariert. Bei der anschließenden Vakuumabscheidung der organischen Filme und der Deckmetallisierung werden diese an den stark unterschrittenen Kathodenseparatoren unterbrochen, so dass die Spalten des Displays elektrisch getrennt sind. Bild 7 belegt am Beispiel eines 5000 Pixel Passiv-Matrix-Displays die gute Homogenität bei hohem Füllfaktor.

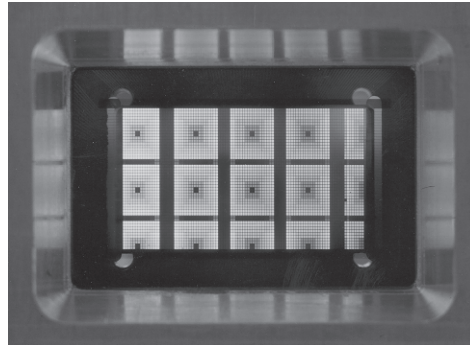


Bild 7: 5000 Pixel PM-Display

Der serielle Ansteuermodus der einzelnen Zeilen eines PM-Displays mit einer Bildwiederholfrequenz von typisch 100 Hz begrenzt aufgrund der Leitungsverluste die Displaygröße auf etwa 128 Zeilen (MUX 128). Für eine hohe Auflösung bei großen Bildschirmdiagonalen ist daher der bei LC-Displays etablierte Aktiv-Matrix-Aufbau unverzichtbar: Auf dem Glassubstrat werden aus polykristallinem Silizium die Treibertransistoren unmittelbar am Ort jedes einzelnen Pixels integriert. Auf diese Weise kann in Aktiv-Matrix-Displays (AM-Displays) jede OLED individuell angesteuert werden, so dass die Notwendigkeit hoher Pulshelligkeiten entfällt. Etablierte Technologien, wie beispielsweise die CMOS- oder LTPS Technik, aber auch junge Arbeitsgebiete wie die der organischen Feldeffekttransistoren (OFETs) sind bereits heute in der Lage, maßgeschneiderte Dünnschichttransistoren bereitzustellen. Ein weiteres wichtiges Gütekriterium ist der Füllfaktor, also der Ausnutzungsgrad der Bildschirmfläche für leuchtende Elemente. Es ist daher sinnvoll die Treiberschaltungen „platzsparend“ unter den organischen Leuchtdioden anzuordnen. Die klassische OLED-Architektur mit einer Lichtemission durch ein transparentes Glassubstrat kann somit nicht mehr als Basiselement für AM-Displays verwendet werden.

Invertierte organische Leuchtdioden erlauben eine Lichtemission durch den obenliegenden Deckkontakt und stellen somit einen vielversprechenden Ansatz zur Realisierung von AM-Displays dar. Wie in Bild 8 dargestellt, basieren sie auf einer Umkehrung der Kontaktreihenfolge sowie der funktionalen organischen Dünnschichten. Die technologische Herausforderung liegt in der Deposition eines transparenten, leitfähigen Metalloxids mit guten Injektionseigenschaften. Durch die Verwendung eines hydrophoben Schutzfilms ist es gelungen, die Materialklasse der hochleitfähigen Polymere für die Verwendung in invertierten Schichtkonfigurationen zu erschließen. Die in Wasser dispergierten Verbindungen werden durch Aufschleudern abgeschieden und zeichnen sich

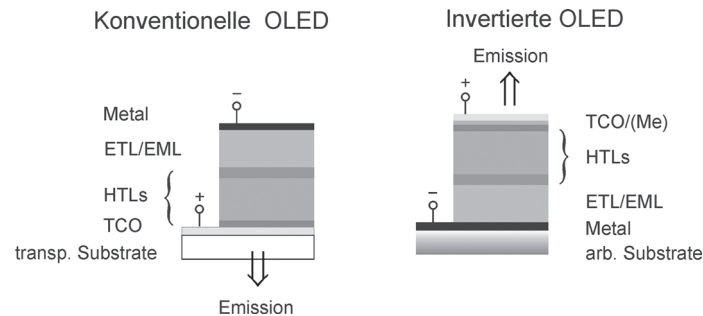


Bild 8: Invertierte OLED für Aktiv-Matrix-Displays

durch ideale ohmsche Kontakteigenschaften mit der verwendeten Anode aus gesputtertem Indium-Zinn-Oxid aus.

Die elektrooptischen Charakteristika von invertierten Leuchtdioden mit unterschiedlichen Emissionsmaterialien für den grünen Spektralbereich sind in Bild 9 zusammengestellt. Die Lichterzeugung der Diode A findet in dem fluoreszierenden Gast-Wirt-System $\text{Alq}_3\text{:Ph-QAD}$ statt und liefert im Bereich der gewünschten Helligkeit von einigen 100 cd/m^2 eine Stromeffizienz von $7,2 \text{ cd/A}$ sowie eine Leistungseffizienz von $2,7 \text{ lm/W}$. Wesentlich leistungsfähiger ist das phosphoreszierende System TCTA:Ir(ppy)_3 in Diode B mit maximalen Effizienzparametern von $15,5 \text{ cd/A}$ und $3,5 \text{ lm/W}$. Phosphoreszierende Materialien nutzen den strahlenden Zerfall von Triplett-Exzitonen und erlauben somit prinzipiell höhere Effizienzen. Der linke Einsatz in Bild 9 zeigt eine invertierte Leuchtdiode

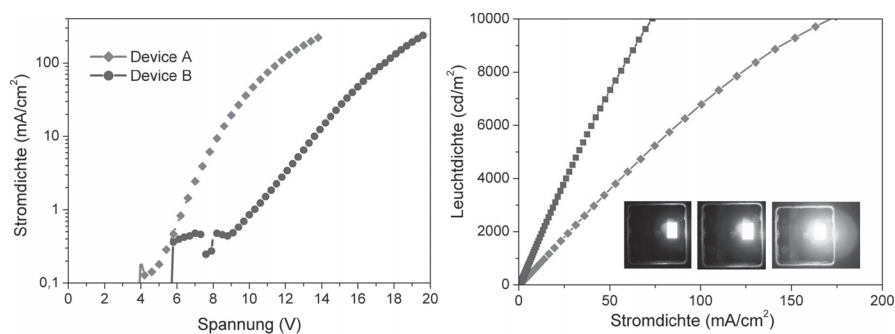


Bild 9: Elektrooptische Charakteristika invertierter OLEDs

im Betrieb bei verschiedenen Aussteuerungen. Bislang wurden maximale Leuchtdichten von 48.000 cd/m^2 und Betriebsspannungen von $5,5 \text{ V}$ erzielt, so dass in der nächsten Entwicklungsstufe nun die Integration mit entsprechenden Treibermatrizen gezeigt werden kann.

Organische Elektronik

Organische Ladungstransportmaterialien verfügen im undotierten Zustand über nahezu keine freien Ladungsträger und sind damit gute Isolatoren. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes können jedoch Ladungsträger angereichert werden, so dass das Material leitfähig wird. In einem Transistor wird dieser „Feldeffekt“ genutzt, um über die Variation der Spannung an einer Steuerelektrode (Gate) den Stromfluss zwischen zwei Elektroden (Drain und Source) eines zweiten Stromkreises zu modulieren. Dies ist schematisch in Bild 10 dargestellt.

Die erste Demonstration eines Feldeffekttransistors auf der Basis von Polythiophen gelang 1986 durch Tsumura und Koezuka [5]. Intensive Forschungsarbeiten sowohl im universitären als auch im industriellen Bereich haben seitdem zu erheblichen Verbesserungen der Bauteileigenschaften geführt. Auch wenn die Leistungsfähigkeit bedingt durch die in organischen Materialien geringe Beweglichkeit der Ladungsträger wohl auch in Zukunft nicht an die der Siliziumtechnologie heranreichen wird, können heute bereits integrierte Schaltungen mit vielen hundert Transistoren aus organischen Materialien aufgebaut werden.

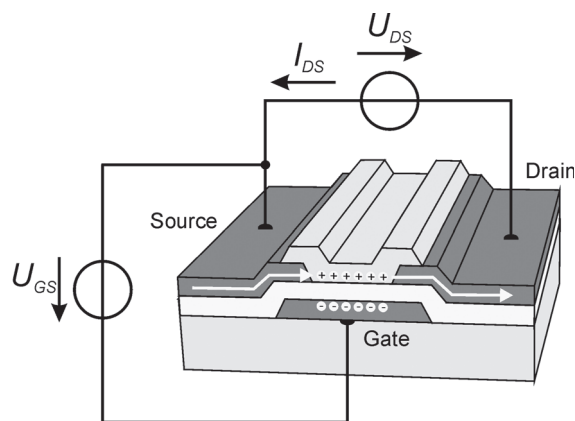


Bild 10: Schematische Darstellung der Funktion eines organischen Feldeffekttransistors: Durch die Steuerspannung U_{GS} werden Ladungen im organischen Halbleiter angereichert, zwischen Source- und Drain-Kontakt kann Strom fließen

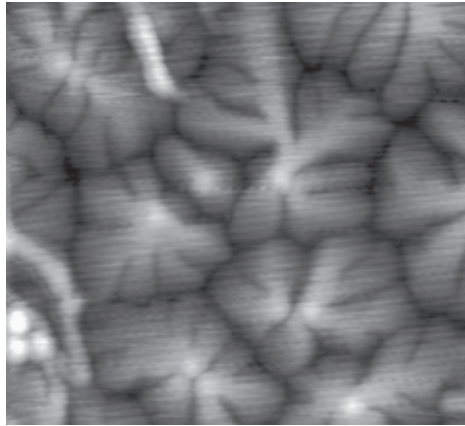


Bild 11: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines Pentacen-Dünnsfilms (2 μm x 2 μm)

Als aktive Materialien haben sich im Bereich der kleinen Moleküle Pentacen und bei den Polymeren Poly(3-hexylthiophen) als besonders geeignet erwiesen. Beide Substanzen haben die Tendenz, bei der Abscheidung als Dünnsfilm geordnete, kristalline Strukturen zu bilden. Dabei entstehen Bereiche mit besonders großem Überlapp der π -Elektronensysteme benachbarter Moleküle, in denen der intermolekulare Ladungstransport durch Hopping-Prozesse im Vergleich zu amorphen Anordnungen erheblich erleichtert wird. Mit diesen Materialien werden daher die höchsten Ladungsträgerbeweglichkeiten erreicht. Bild 11 zeigt beispielhaft eine Rasterkraftmikroskop-Aufnahme eines Pentacen-Films. Deutlich zu erkennen sind die dendritischen Strukturen der kristallinen Bereiche.

Da sich diese Materialien aus einer Lösung oder durch einfaches thermisches Verdampfen aufbringen lassen, können die aus der klassischen Halbleitertechnik bekannten, kostenintensiven Epitaxie-, Diffusions- und Abscheidungsprozesse vermieden werden. Stattdessen besteht die Möglichkeit, Drucktechniken oder verwandte Verfahren zu nutzen, um elektronische Schaltungen aus „Plastik“ sehr preiswert herzustellen. Die kostengünstige Herstellung bietet große Chancen für Anwendungen, in denen der Preis gegenüber der Leistungsfähigkeit im Vordergrund steht. Die organische Elektronik kann hier die Siliziumtechnologie ergänzen.

Die Chance, einfache und großflächig einsetzbare Prozesse für die Produktion zu nutzen, stellt gleichzeitig die größte Herausforderung dieser Technologie dar: Um Bauelemente mit ausreichend guten elektrischen Eigenschaften zu erhalten, muss die Kanallänge (der Abstand zwischen Drain- und Source-Elektro-



Bild 12: Mikroskop-Aufnahme eines Polymer-Transistors

de) im Bereich weniger Mikrometer liegen. Die bisher bekannten Druckverfahren sind jedoch an die geringeren Anforderungen des menschlichen Auges angepasst und liefern daher eine zu schlechte Strukturauflösung. Ein großer Teil der Arbeiten im Bereich der organischen Elektronik widmet sich daher der Entwicklung von Techniken, mit denen auf einfache Weise sehr feine, leitfähige Strukturen hergestellt werden können.

Dazu wurden bereits erfolgreich fotochemische Verfahren, optimierte Drucktechniken (z.B. Inkjet, Mikrokontakt-Druck) und Laser-Ablation eingesetzt. Bild 12 zeigt die Mikroskopaufnahme einer Transistorstruktur, die mit einem elektrochemischen Druckverfahren hergestellt wurde. Dabei wird eine vorstrukturierte Anode als „Druckform“ verwendet, die „Druckfarbe“ ist ein leitfähiges Polymer, das sich nur auf den metallischen Bereichen der Anode bildet. Ein Verlaufen der Farbe, das bei herkömmlichen Drucktechniken die Auflösung begrenzt, kann hier nicht auftreten. Die Kanallänge (die Breite der mäanderförmigen Lücke zwischen den beiden Elektroden) beträgt bei der gezeigten Struktur nur 5 μm .

Besondere Möglichkeiten ergeben sich durch eine Verbindung von organischen Feldeffekttransistoren mit OLEDs. Da für leistungsfähige Displays mit hoher Auflösung eine aktive Ansteuerung der einzelnen Bildpunkte erforderlich ist, muss mit jeder OLED eine Schaltung integriert werden, die den gewünschten Helligkeitswert solange speichert, bis neue Bildinformationen geschrieben werden. Bisher werden entsprechende Ansteuerschaltungen mit Dünnschichttransistoren aus polykristallinem Silizium realisiert. Da die Abscheidung des Siliziums bei Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius erfolgt, können bisher nur Glassubstrate als Träger für Aktiv-Matrix Bildschirme verwendet werden. Der Herstellungsprozess für organische Transistoren ist dagegen auch mit Kunststoffmaterialien und Folien kompatibel. Somit bietet sich die Möglichkeit, leichte, flexible und leistungsfähige OLED-Displays herzustellen.

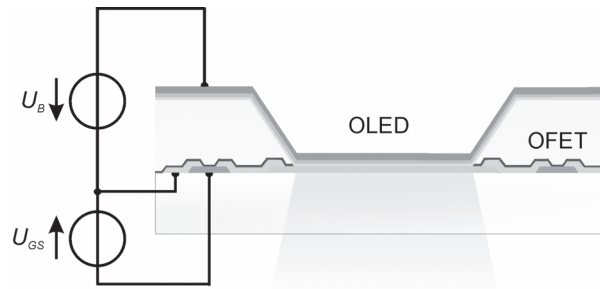


Bild 13: Querschnitt durch ein „Smart Pixel“

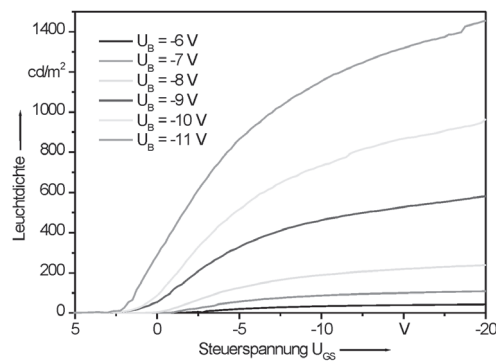


Bild 14: Abhängigkeit der Leuchtdichte von der Steuerspannung eines „Smart Pixel“

Ein zentrales Element eines OLED-Pixeltreibers ist ein Transistor, der in der Lage ist, den benötigten Strom für die OLED zu schalten. Bild 13 zeigt schematisch den Aufbau eines „Smart Pixel“, bei dem OLED und OFET monolithisch integriert sind. Die Helligkeit der OLED kann durch die Gate-Spannung des Transistor gesteuert werden (Bild 14).

Organische Laser

Mit zunehmendem Erfolg organischer Leuchtdioden (OLEDs) sind die organischen Emissionsmaterialien auch für Laseranwendungen interessant geworden. Eingehende Untersuchungen zu optisch angeregter ASE (Amplified Spontaneous Emission) lieferten den Beweis für das Vorhandensein der für Laser notwendigen Besetzungsinversion. Weiterführende Untersuchungen des optischen Ge-

winns, sowie die erfolgreiche Realisierung verschiedenster Laserbauelemente, zeigen das enorme Potential der organischen Emissionsmaterialien. Die Forschungsbemühungen zielen hierbei auf günstig herstellbare, weit durchstimmbare Laserdioden für den gesamten sichtbaren Spektralbereich.

Dieser Reihe von Vorteilen solcher Bauelemente steht jedoch eine Anzahl praktischer Probleme entgegen, die es zu lösen gilt. Im Gegensatz zu OLEDs, die mit geringen Betriebsströmen (mA/cm^2) arbeiten, ist für den Laserbetrieb eine Hochstromanregung (kA/cm^2) erforderlich. Hierdurch werden extreme Anforderungen an solche Bauelemente hinsichtlich Stromzuführung und Wärmeableitung gestellt. Des weiteren treten negative Effekte in den Vordergrund, welche die Effizienz der eingepägten Ladungsträger herabsetzen.

Die in jüngster Zeit erzielten Fortschritte auf dem Gebiet optisch angeregter organischer Laserbauelemente untermauern die vielversprechenden Eigenschaften wie Emissionswellenlänge und Durchstimmbarkeit. Hierbei kommen als aktive Lasermaterialien prinzipiell alle organischen Materialsysteme in Frage, welche bei geeigneter Anregung optischen Gewinn aufweisen. Für den roten Spektralbereich werden dotierte Gast-Wirt-Systeme aus Alq_3 :DCM2 und CBP:DCM2 verwendet. Bei solchen Materialsystemen erfolgt zunächst die Besetzung der LUMO-Zustände der Wirtsmatrix (Alq_3 , bzw. CBP) durch Absorption der Pumpstrahlung. Über strahlungslose Energieübergänge (Förster-Transfer) werden dann die LUMO-Zustände des Gastemitters (DCM2) angeregt. Diese bilden das obere Laserniveau und zerfallen unter Photonenemission.

Der Aufbau der Laserbauelemente (Bild 15) orientiert sich dabei am DFB-Laser (DFB: distributed feedback) und besteht im wesentlichen aus einem vor-

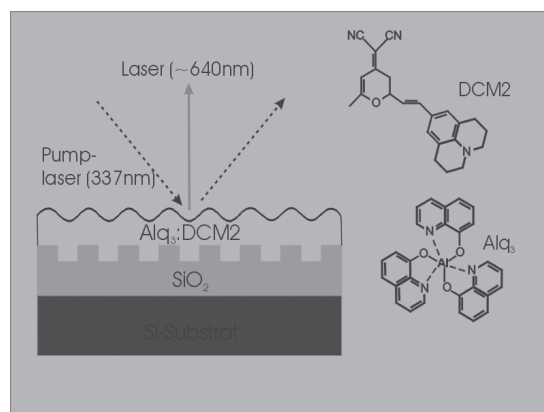


Bild 15: Aufbau des Lasers und Struktur der organischen Materialien

strukturierten Substrat und der organischen Emissionsschicht. Somit entsteht ein Filmwellenleiter, der über die Substratoberfläche die für Laseremission erforderliche Rückkopplung sicherstellt.

Als Substratmaterialien werden hauptsächlich oxidierte Siliziumwafer verwendet. Die Strukturierung der Substratoberfläche zur Erzeugung des DFB-Gitters erfolgt in der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Dort wird mittels Elektronenstrahlolithographie und geeigneten Ätzverfahren eine rechteckförmige Modulation der Oxidschicht erzeugt. Die Strukturen dieser Modulation weisen Stegbreiten von bis zu 100nm und Stegtiefen von ebenfalls etwa 100nm auf. Diese Modulation des Substrates erzeugt im späteren Laserbauelement über die Bragg-Bedingung eine verteilte Rückkopplung im Filmwellenleiter (DFB-Resonator) und gibt somit die Emissionswellenlänge des Lasers vor.

Am Institut werden dann in einer Cluster-OMBD-Anlage die organischen Emissionsschichten aufgedampft. Anschließend findet die optische Charakterisierung der Bauelemente statt. Dies geschieht im Vakuum, um Degradationsprozesse des Emitters zu verlangsamen. Durch ein UV-transparentes Quarzglasfenster an der Vakuumkammer erfolgt die optische Anregung der Laserproben. Als Pumpquelle wird ein gepulster Stickstofflaser verwendet. Die Anregungswellenlänge liegt im UV-Bereich bei 337nm. Je nach Auslegung des Bragg-Gitters erfolgt dann die Laseremission der Probe in der ersten oder zweiten Beugungsordnung. Für einen Resonator erster Ordnung ergibt sich eine Emission aus der Probenkante, die zweite Ordnung liefert Laseremission orthogonal zur Probenoberfläche.

Die Spektren dieser Laser zeigen Halbwertsbreiten von etwa 0,1nm und lassen sich durch Wahl der Gitterperiodizität über dem Gewinnspektrum abstimmen (Bild 16). Für Alq₃:DCM2 wurden so Durchstimmbarkeiten von 37,6nm im roten Spektralbereich erzielt [6]. Bild 17 zeigt die Fernfeldaufnahme eines solchen Lasers.

Die an der Laserschwelle benötigte optische Anregungsenergiedichte liegt für Substratgitter zweiter Ordnung im Bereich einiger 10µJ/cm². Mit der Verwendung von Gittern erster Ordnung konnte diese um den Faktor 10 gesenkt werden, was besonders für elektrische Anregung von großer Bedeutung sein wird.

Die erfolgreichen Untersuchungen an optisch gepumpten organischen Laserbauelementen sind jedoch nur ein erster Schritt zum elektrischen Betrieb. Hierfür sind noch einige Hürden zu bewältigen. Soll das Aufbaukonzept der OLED auch für OSL Verwendung finden, so müssen die Ausmaße des Wellenleiters auf etwa eine Materialwellenlänge ausgedehnt werden. Gleichzeitig muss jedoch eine Stromdichte von etwa einem kA/cm² erreicht werden. Hierbei stellt vor allem die geringe Leitfähigkeit organischer Materialien ein Problem dar. Des

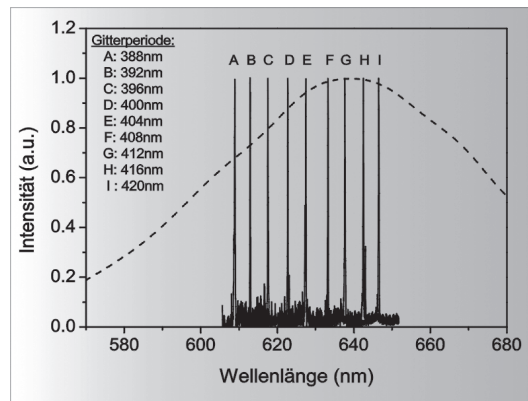
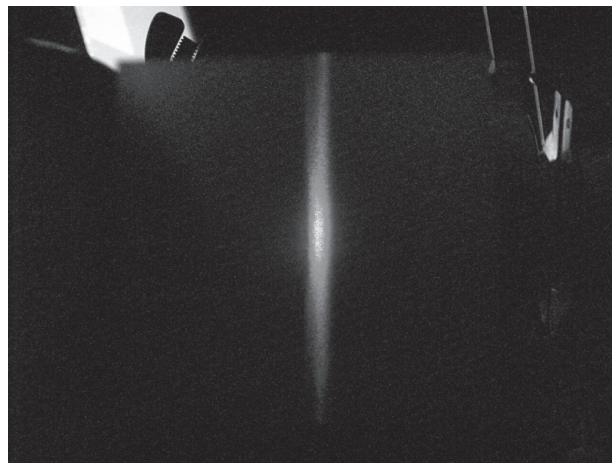


Bild 16: Laserspektren für verschiedene Gitterperiodizitäten

Bild 17: Fernfeldaufnahme eines Alq₃-DCM2-Lasers

weiteren müssen die verschiedenen Auslöschungseffekte, welche bei Hochstromanregung auftreten, untersucht und minimiert werden. Diese Schwierigkeiten sind auch der Grund dafür, dass bis heute noch keine elektrisch angeregte Besetzungsinversion in amorphen organischen Dünnschichten nachgewiesen werden konnte.

Die Kürze des Beitrags erlaubt keine umfassende Darstellung der Polytronik. Drei Beispiele wurden gewählt, um das Potential dieses neuen Arbeitsgebiets zu

belegen. Weitere Schwerpunkte liegen in den Bereichen Sensorik, Mikrosystemtechnik und integrierte Optik. Die Bedeutung der noch jungen Polytronik dürfte somit bereits in naher Zukunft erheblich anwachsen.

Derartig komplexe experimentelle Forschungsarbeiten erfordern ein hochmotiviertes interdisziplinäres Forschungsteam und eine aufwendige technologische und messtechnische Ausstattung. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verdienen daher unbedingt eine namentliche Nennung in diesem Beitrag (unter Verzicht auf akademische Grade): E. Becker, T. Dobbertin, G. Dobрева, M. Dümeland, G. Ginev, S. Hartmann, A. Janssen, H.-H. Johannes, A. Kammoun, H. Krautwald, M. Kröger, U. Lawrentz, R. Parashkov, T. Rabe, T. Riedl, C. Schildknecht, D. Schneider. Weiterhin gilt unser aller Dank dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur in Hannover und dem Präsidium der Technischen Universität Braunschweig, die durch umfangreiche Investitionen die technologischen Arbeiten erst ermöglicht haben. Eine derartige Förderung kann aber nur die Voraussetzungen für die Forschungstätigkeit schaffen. Sie entbindet nicht von der Notwendigkeit, für die einzelnen Forschungsthemen Projektmittel einzuwerben. Wir danken daher dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderzeichen 01 BK 918, 13N8216, 01 BI 162, 13N8166), der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Volkswagenstiftung und der Europäischen Union für eine umfangreiche kontinuierliche Förderung und zahlreichen Unternehmen für eine vertrauliche, intensive Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] LÜDEMANN, C.: Einladung zur Presseveranstaltung Polytronik, Fraunhofer Verbund Mikroelektronik, Berlin, 8.2002.
- [2] MENTLEY, D. E.: State of Flat-Panel Display Technology and Future Trends. Proceedings of the IEEE 90 (2002) 4: 453-459.
- [3] METZDORF, D.: Organische Passiv-Matrix-Displays. ISBN3-89873-764-0 Cuvillier Verlag Göttingen 2002.
- [4] BMBF- Förderung 01 BK 918.
- [5] Applied Physics Letters Vol 49(18) pp. 1210-1212, 1986.
- [6] SCHNEIDER, D. et al.: Wavelength-tunable organic solid-state distributed-feedback laser. Applied Physics B 77: 399-402 (2003).